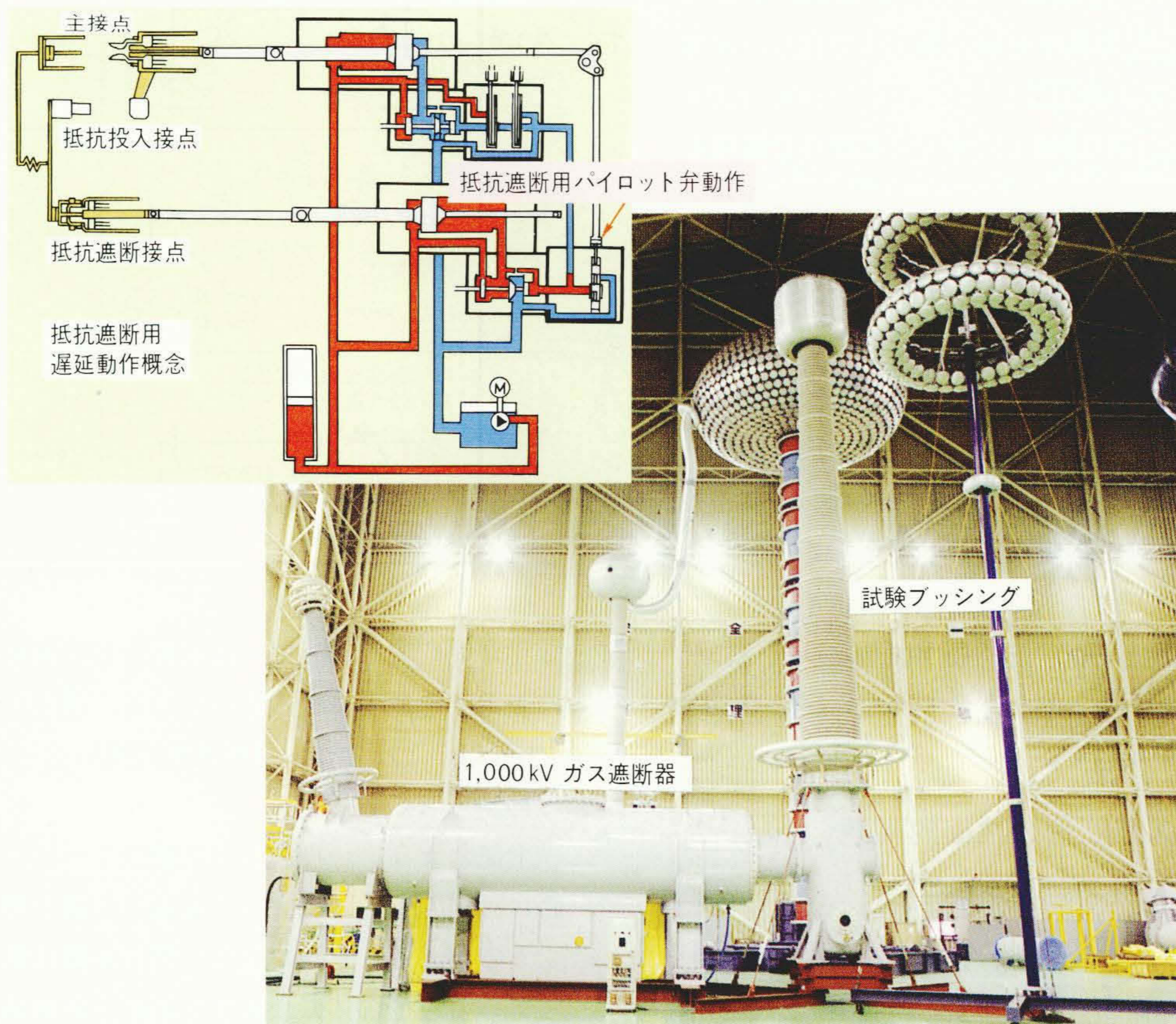


1,000 kVガス遮断器の開発

—抵抗投入・抵抗遮断方式, 2点切りガス遮断器—

Development of Ultra-High Voltage SF₆ Gas Circuit Breaker Using Switching Resistor in Closing and Opening Operation

山形芳文* Yoshibumi Yamagata 高本 学** Manabu Takamoto 北東広道** Hiromichi Hokutō
田中晃司* Kōji Tanaka 大門五郎** Gorō Daimon 筑紫正範*** Masanori Tsukushi



1,000 kVガス遮断器の絶縁試験状況と遅延動作概念図

対地・極間の検証だけでなく、接点間の絶縁協調や絶縁限界など、各種信頼性検証試験を実施した。

1,000 kV送電を実現するためには、ガス絶縁開閉装置の主開閉機器であるガス遮断器をコンパクトに構成することはもちろんのこと、系統開閉時の過電圧を極力抑制して、絶縁レベルを低減する必要がある。このため、従来500 kV用ガス遮断器で採用されていた抵抗投入方式だけでなく、抵抗遮断方式を新たに採用している。

日立製作所は、1遮点当たりの大容量化・高性能化を実施し、1,000 kV 50 kAガス遮断器を2点/相で構成可能な遮断部を開発した。この遮断部は500 kV 63 kAガス遮断器にも適用され、1点/相構成の

ガス遮断器を実用化している。抵抗投入接点は主接点から先行して投入する必要があるが、主接点と一体で構成することによって先行投入の時間管理を容易にしている。一方、主接点から規定の時間遅延して遮断する抵抗遮断接点は、主接点と並列に構成して操作機構も独立した配置となっており、油圧操作器作動油の粘性の変化の影響を受けにくい機械的遅延動作方式としている。そのため、外気温度や操作油圧の変化などの影響を受けにくく、安定した抵抗遮断を可能としている。

* 東京電力株式会社 送変電建設本部 ** 日立製作所 国分工場 *** 日立製作所 日立研究所 工学博士

1 はじめに

1,000 kV送電を実現するためには、送電システムの主保護開閉機器であるガス遮断器の開発が不可欠である。一方、ガス遮断器の開閉動作時には系統に開閉サージが発生するが、従来の500 kV系統の延長で絶縁設計を行うと、特に送電鉄塔などの気中絶縁設備が大型化し、立地上も環境調和上も大きな問題となる。このため、1,000 kVガス遮断器では、従来500 kV用ガス遮断器で採用している抵抗投入方式に加え抵抗遮断方式が必要となってくる。抵抗遮断方式とは、主接点の遮断後電流を抵抗に転流し、引き続き抵抗接点で遮断する方式である¹⁾。

このため、主接点の開極後、規定の時間で抵抗遮断接点を動作させる遅延動作機構の開発が必要となってくる。また、500 kV用ガス遮断器の約15倍の大質量の抵抗体が必要となるため、コンパクトな配置設計および主接点、抵抗接点との合理的接続構成が必要となる。

ここでは、1,000 kVガス遮断器開発上のポイントとなる、主接点および抵抗接点、遅延動作機構、抵抗体の配置等に対する設計上の基本的な考え方、ならびにそれらの構成などについて述べる。

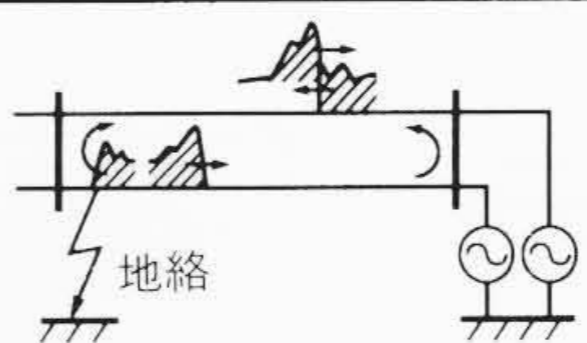
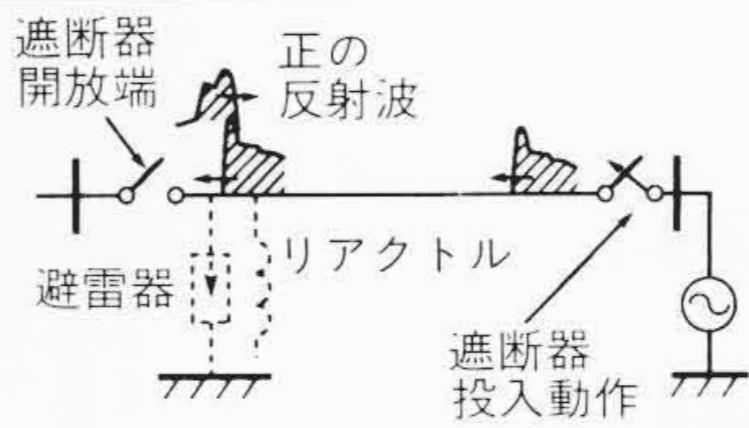
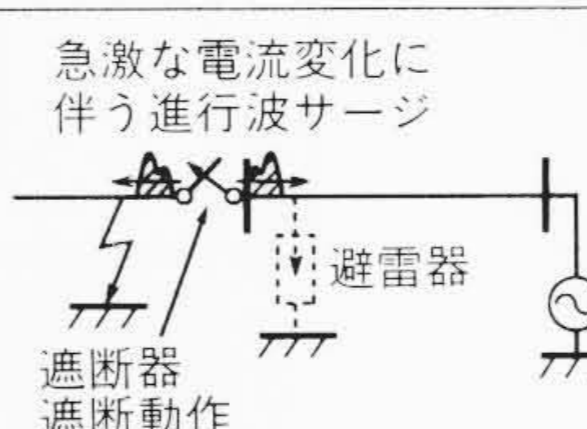
2 1,000 kVガス遮断器の技術的課題

2.1 開閉サージ領域の過電圧抑制

500~1,000 kV級の領域では、空気中の絶縁距離の増加に対して、特に開閉サージに対する絶縁耐力が飽和傾向を示す。このため、送電鉄塔のコンパクト化を実現するためには、系統に発生する開閉サージ領域の過電圧を抑制することがきわめて重要となる。開閉サージ領域の過電圧発生メカニズムと主な抑制方法を表1に示す。

- (1) 地絡サージは地絡事故発生時の故障相の急激な電圧変化が健全相に誘導され、健全相の交流電圧上昇に重畳することによって発生する。送電線の中にサージの最大値が発生する傾向があるため、変電所の避雷器による抑制効果は小さく、有効な抑制方法はない。過電圧倍数は大地に対して1.6 p.u.以下であり、これが開閉サージに対する1,000 kV機器の絶縁レベルを決定づける。
- (2) 投入サージは、無負荷送電線を遮断器で充電するときに、投入前の遮断器両端の電圧差が進行波となって送電線上を往復反射して、過電圧を発生するものである。過電圧倍数は理論上3 p.u.以上となるが、抵抗投入方式によって地絡サージレベルの1.6 p.u.以下に抑制可能である。
- (3) 遮断サージは、遮断時に生じる故障相の急激な電流

表1 開閉サージ領域の過電圧発生メカニズムと主な抑制方法
1,000 kV送電システムのコンパクト化を実現するためには、ガス遮断器開閉時に発生する開閉サージ領域の過電圧を抑制することが重要である。

サージ発生要因	発生メカニズム	過電圧倍数	抑制方法
地絡		1.6 p.u.	有効な抑制方法はない。
遮断器投入		>3 p.u.	<ul style="list-style-type: none"> ● 投入抵抗 (1.6 p.u.) ● 避雷器設置 (1.9 p.u.) ● リアクトル設置 (2.5 p.u.)
遮断器遮断		>2 p.u.	<ul style="list-style-type: none"> ● 遮断抵抗 (1.6 p.u.) ● 避雷器設置 (1.9 p.u.)

変化が進行波となって、送電線上を往復反射して健全相に過電圧を発生させるものである。過電圧倍数は理論上2 p.u.以上となるが、抵抗遮断方式によって1.6 p.u.以下に抑制可能である。

上記のように、投入および遮断サージともに抵抗を回路に挿入することによって過電圧倍数を抑制することができるが、それぞれの過電圧倍数と抵抗値の関係は異なっている。抵抗体による開閉過電圧抑制効果を図1に示す。同図によれば、400~700 Ω程度の範囲で投入および遮断サージともに1.6 p.u.以下に抑制可能である。一方、抵

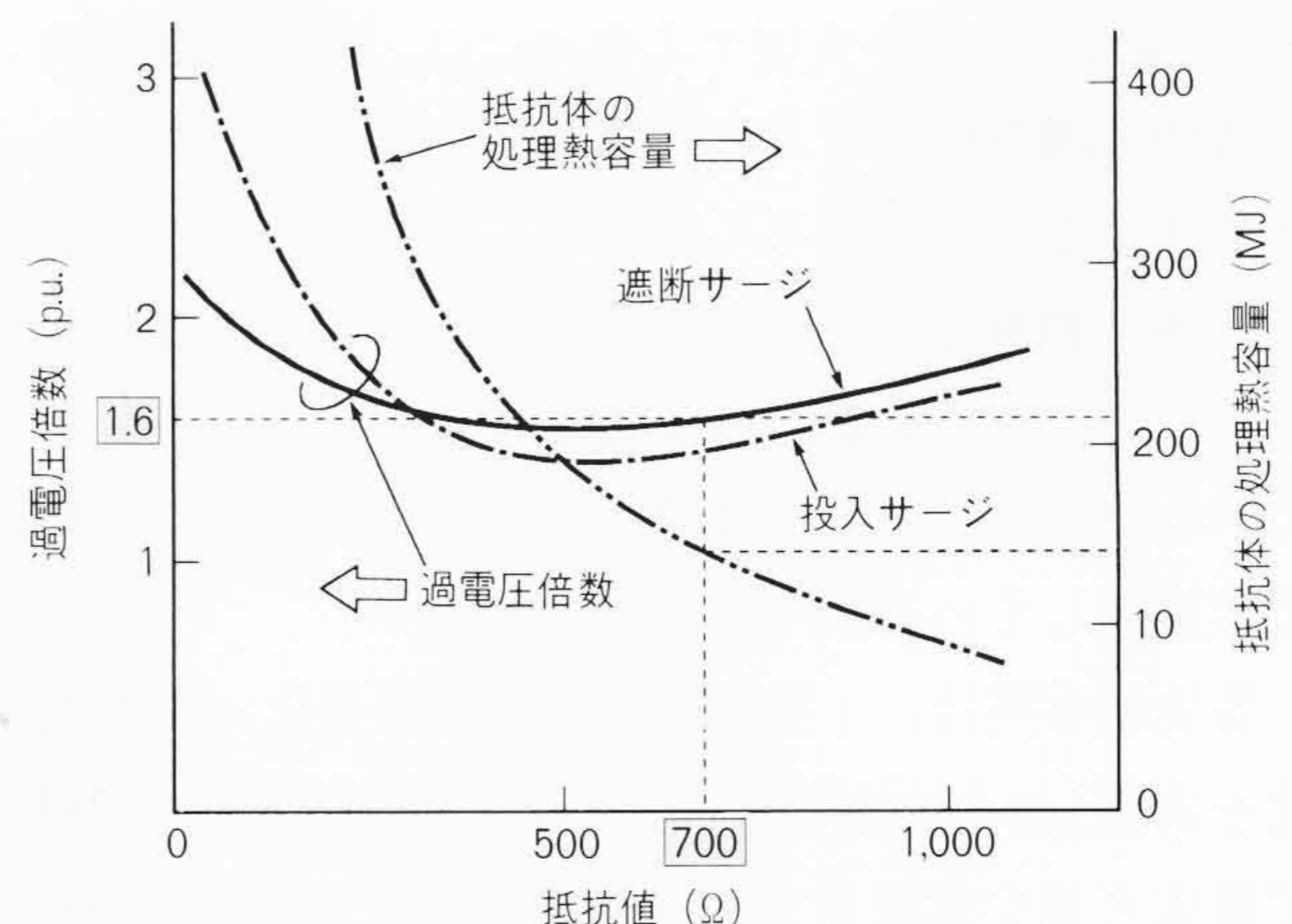


図1 抵抗体による開閉過電圧抑制効果

地絡サージによる過電圧倍数1.6 p.u.以下に抑え、かつ抵抗体通電によって発生する熱量(処理熱容量)を極力低くする方針で抵抗値700 Ωが選定された。抵抗体は投入・遮断に兼用される。

抗体が処理すべき熱容量(熱エネルギー)は抵抗値が低いほど大きく、したがって、抵抗値は700 Ωと設定している。

2.2 接点の開閉性能

ガス遮断器の接点の開閉性能は、解析技術の向上とともに飛躍的な大容量化と小型化を達成している。1,000 kVガス遮断器は当初4点/相構成で計画されていたが、2点/相構成が可能となり、さらに500 kV 63 kAガス遮断器も1点/相構成が達成され、コンパクト化・部品点数の削減などが可能となった²⁾。遮断部所要責務の比較を表2に示す³⁾。

主接点に関しては、500 kV 63 kAのほうが1,000 kV 50 kAよりもより過酷な責務となっている。1,000 kV系統の遮断電流は、(1)基本波電流に対する高調波電流の割合が増大し、含有率が10%程度に達するため、電流零点近傍の電流傾斜 di/dt は基本波電流換算で63 kA程度になる。(2)送電線の損失が少なくなるため、直流分時定数が長くなり、遮断時点の直流分含有率は従来の65%に対し80%と大きくなる。これらの点から1遮断部当たりの責務は、500 kV 63 kA定格遮断部と同等になる。電流遮断後の過渡回復電圧については、抵抗遮断しているので500 kVよりも低減される²⁾。

主接点の構造を図2に示す。従来多くの実績を持つ軸

方向同期吹き付け方式を採用し、またアーク接触子近傍でのガス密度を増加させるため多段形絶縁ノズルを併用しており、シンプルな構造となっている。

また、主接点の大電流遮断技術に関しては、SF₆ガスの熱ガス流の解析技術の向上によって、設計段階から詳細に検討を実施することが可能となっている。大電流遮断時のSF₆ガス温度分布の時間変化例を図3に示す。熱ガス流解析コードとして、衝撃波発生を伴う超音速流を解析可能なFLIC(Fluid In Cell)法を用い、SF₆ガスの実在気体特性をモデル化している⁴⁾。

抵抗遮断接点は、遮断電流は小さいものの、進み小電流遮断時に500 kV責務を超える電圧に耐える必要があり、このためには、優れた絶縁回復特性を持った接点が必要となる。

2.3 抵抗投入・遮断の動作時間協調

1,000 kVガス遮断器の抵抗投入・遮断を実現するためには、抵抗接点は主接点と一定の時間協調を持って駆動しなければならない。抵抗投入・遮断の動作時間協調を図4に示す。

投入接点は500 kV器と同様に、主接点の可動側(パツファシリンド)と一体に動作する可動電極と固定電極で構成する。抵抗投入接点の固定電極側は、ワイピングば

表2 遮断部所要責務比較

1,000 kV 50 kAガス遮断器の遮断部は、500 kV 63 kA 1点切りGCBの遮断部2直列と、新規開発の抵抗遮断部2直列で構成する。

項目	機 器	500 kV 63kA 1点切りGCB	1,000 kV 50 kA 2点切りGCB(電圧分担係数1.1/2)	
遮断部(接点)構成		<p>遮断部(A)</p> <p>遮断責務はMだけで負担</p>	<p>遮断部(A)</p> <p>遮断部(B) (新規開発)</p> <p>遮断部(B) (新規開発)</p> <p>遮断責務はM₁, M₂とR₀₁, R₀₂で負担</p>	
遮断接点		主接点(M)	主接点(M ₁ , M ₂)	抵抗遮断接点(R ₀₁ , R ₀₂)
極間雷インパルスAC重畳耐電圧(kV)		2,118	1,587	1,587
100%BTF遮断電流(kA)		63	50	1(脱調遮断時2 kA)
100%BTF定格過渡回復電圧(kVp)		817	762	660
90%SLF初期上昇率(kV/μs)		11.3	4.4	1.65
進み小電流波高値(kVp)		1,258	495	1,384
責務の根拠		JEC-2300規格値	開発仕様値 (責務は1遮断点当たりの数値を示す。)	

注：略語説明および記号説明

GCB(ガス遮断器), M, M₁, M₂(主接点), R_c, R_{c1}, R_{c2}(抵抗投入接点), R₀₁, R₀₂(抵抗遮断接点), R(抵抗体), BTF(端子短絡故障) SLF(近距離線路故障)

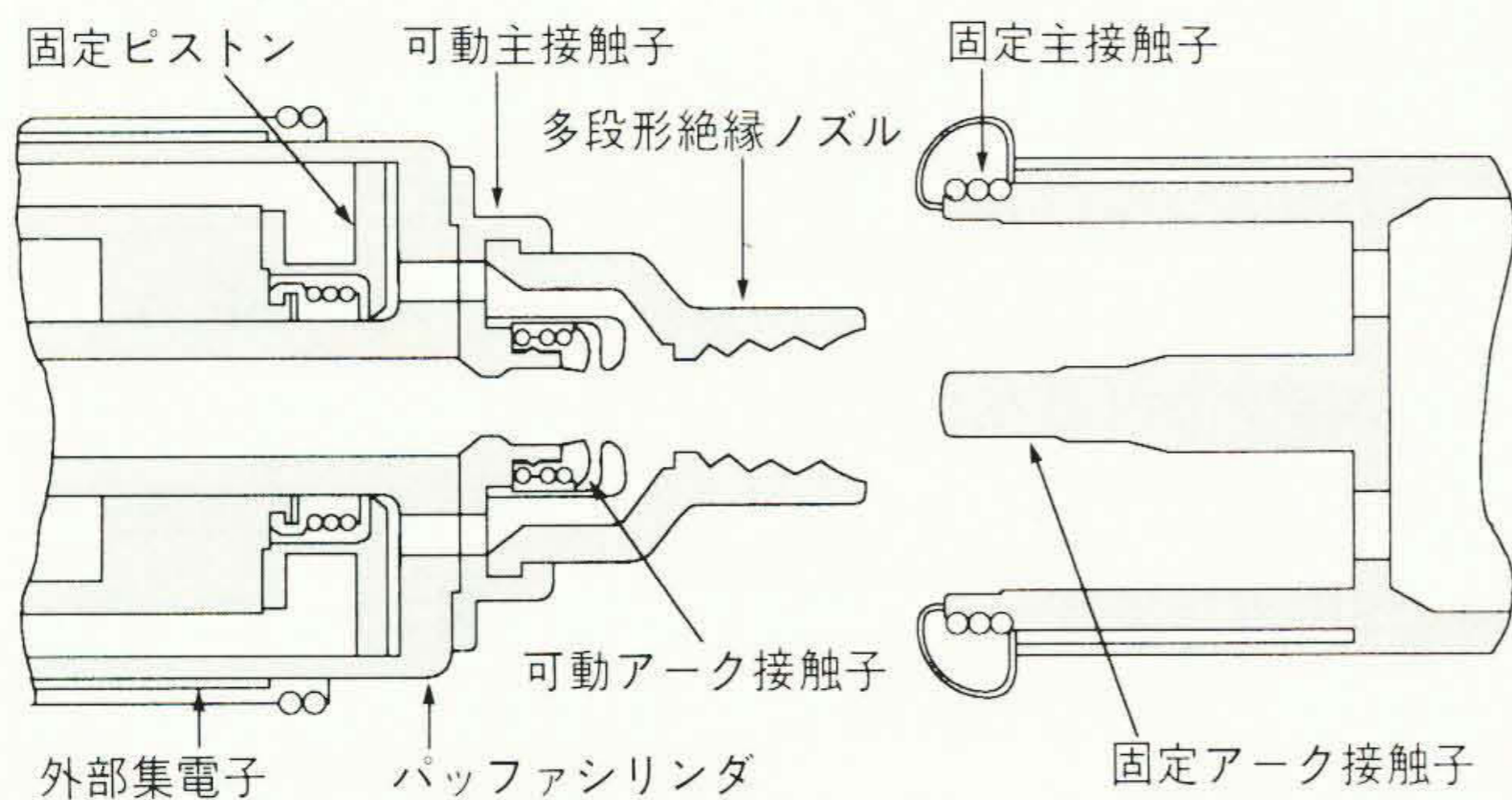


図2 主接点の構造

1,000 kV 2点切りガス遮断器で開発された遮断部は、軸方向同期吹き付け方式に多段形絶縁ノズルを併用したシンプルな構造である。

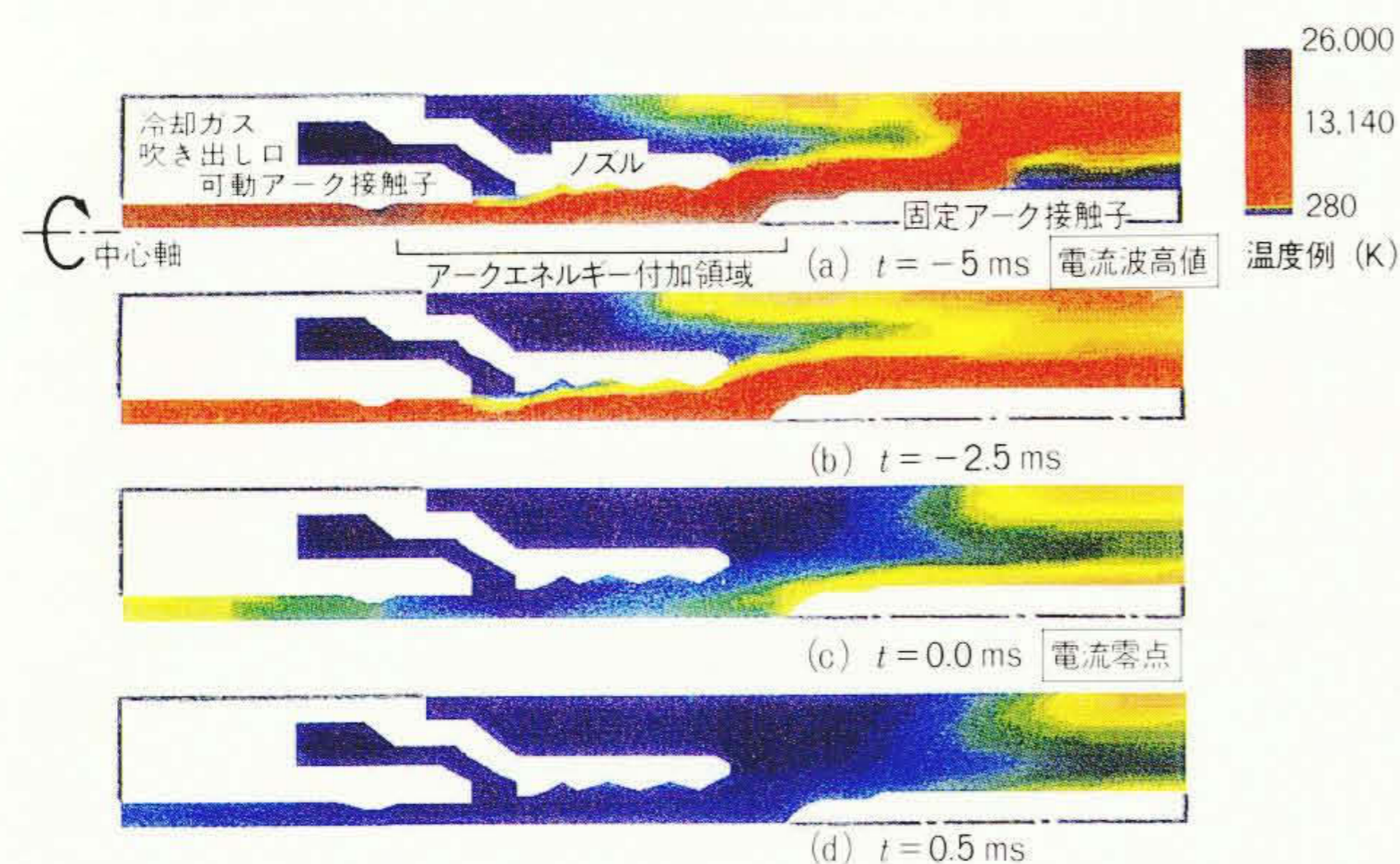


図3 電流遮断時のSF₆ガス温度分布の時間変化

SF₆ガスの実在気体特性モデル化、熱伝導の考慮などにより、熱ガス流解析を用いたガス遮断器電流遮断時の詳細検討が可能となった。

ねを持っており、主接点投入よりも10~12 ms先行して投入する。時間協調は、主接点と抵抗投入接点の機械的なタッチ差で決定される。

抵抗遮断接点は、遮断電流を確実に抵抗体に転流させるために、主接点の最小アーク時間と零点推移現象を考慮した有効遮断時間幅を検討して、最小30 msの遅延動作時間を必要としている。また製作時の公差や操作油圧の変動を考慮して、抵抗体の処理熱容量をできるだけ増加させない範囲で最高34 msの許容幅を考慮している。なお、投入時には抵抗遮断接点は主接点と同時に投入動作を開始する。

3 UHVガス遮断器の基本構造と動作原理

3.1 遅延動作メカニズム

主接点および抵抗遮断接点の操作機構は、これまで多数の実績を持っている油圧操作器から構成され、それらの中に機械的な遅延動作伝達機構が設置されている。主

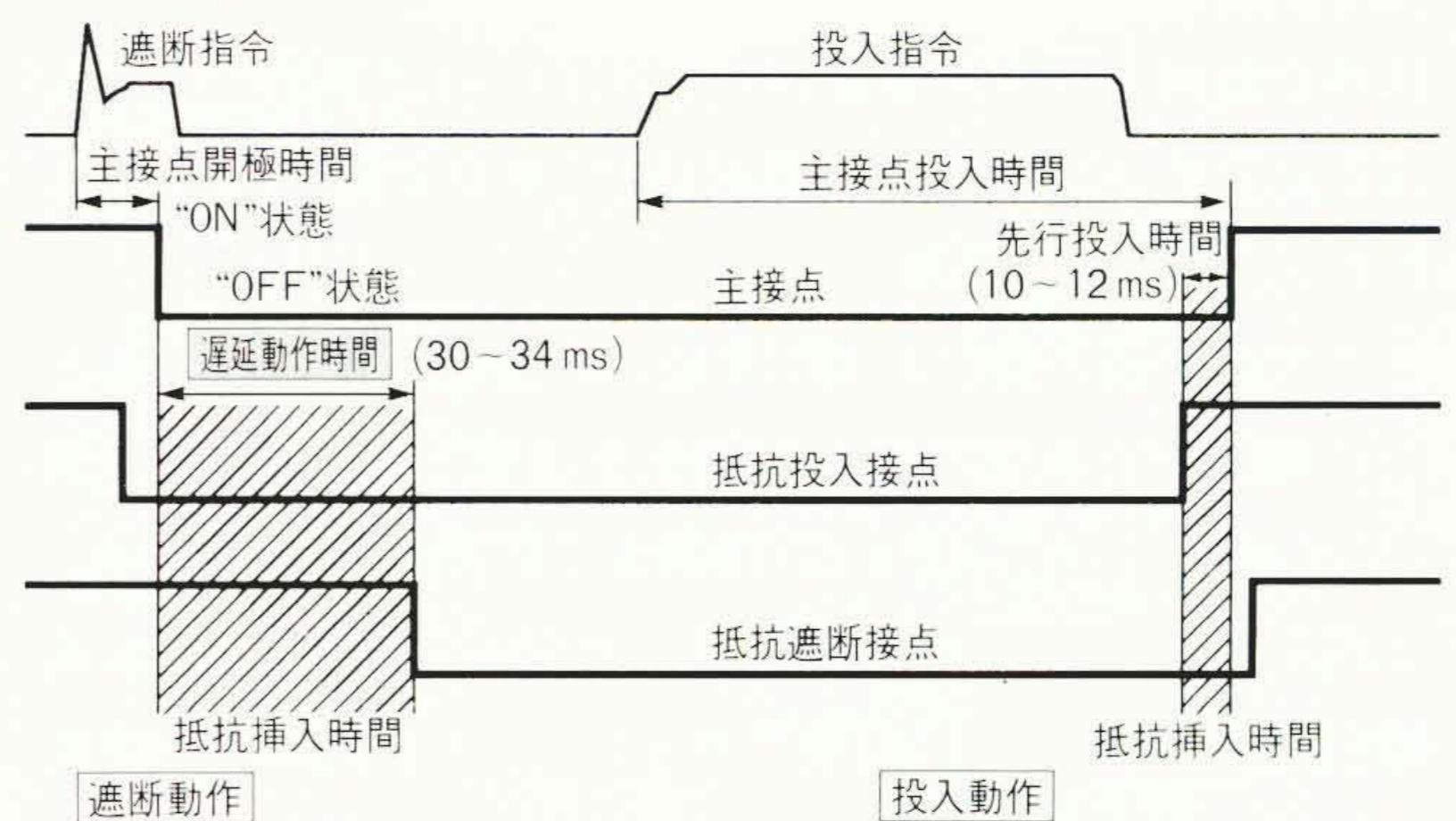


図4 抵抗投入・遮断の動作時間協調

1,000 kVガス遮断器では、抵抗遮断接点を主接点の開極後、遅延動作時間だけ遅れて開極させる必要がある。

接点のストロークを信号化して抵抗遮断接点の操作機構に伝達する方式としては、他に電氣的機構、油圧的機構などが考えられる。しかし、油圧的な回路では低温時の作動油の粘性の変化により、動作時間のばらつきが大きくなる傾向がある。このため日立製作所は、主接点の設定ストロークで確実に動作し、かつその信号を他の外部影響を受けずに抵抗遮断接点の操作機構に機械的に伝達する遅延動作伝達リンクを開発した。そのメカニズムを図5に示す。なお、電氣的回路も前記の機械的手段のバックアップ回路として併用した。

それぞれの操作機構は、パイロット弁、主弁および操作弁で構成する。これらの構成は500 kVガス遮断器と同一である。主接点の操作ピストンの端部は、直接遅延動作伝達リンクに接続されている。図5(a)の投入状態から引外し用電磁フック機構が励磁されると、パイロット弁および主弁が動作して、操作弁中の操作ピストンが同図(b)のように画面右側に動作する。主接点が75~85%ストロークした時点で、遅延動作伝達リンクは同図(c)のように抵抗遮断接点用パイロット弁を動作させる。製作上の公差を吸収して所定の遅延動作時間を確保するように、遅延動作伝達リンクの動作設定ストロークが組立時に調整される。(c)からは主接点と同一の原理で、抵抗遮断接点用操作ピストンが駆動される。

機械的遅延動作機構の時間的変化をみるため、1,000 kVガス遮断器を大型環境試験設備に持ち込み-30~60℃の環境下で開閉試験を実施した。ガス遮断器の動作責務上、最も過酷と考えられる再閉路鎖錠圧力条件30 MPaから動作させた“O”-0.35秒-“CO”の2回目の“O”で、製作仕様の-20℃でも十分満足する結果を得た⁵⁾。

3.2 抵抗体ユニットの構成

投入・遮断に兼用される抵抗体の処理熱容量は、地絡

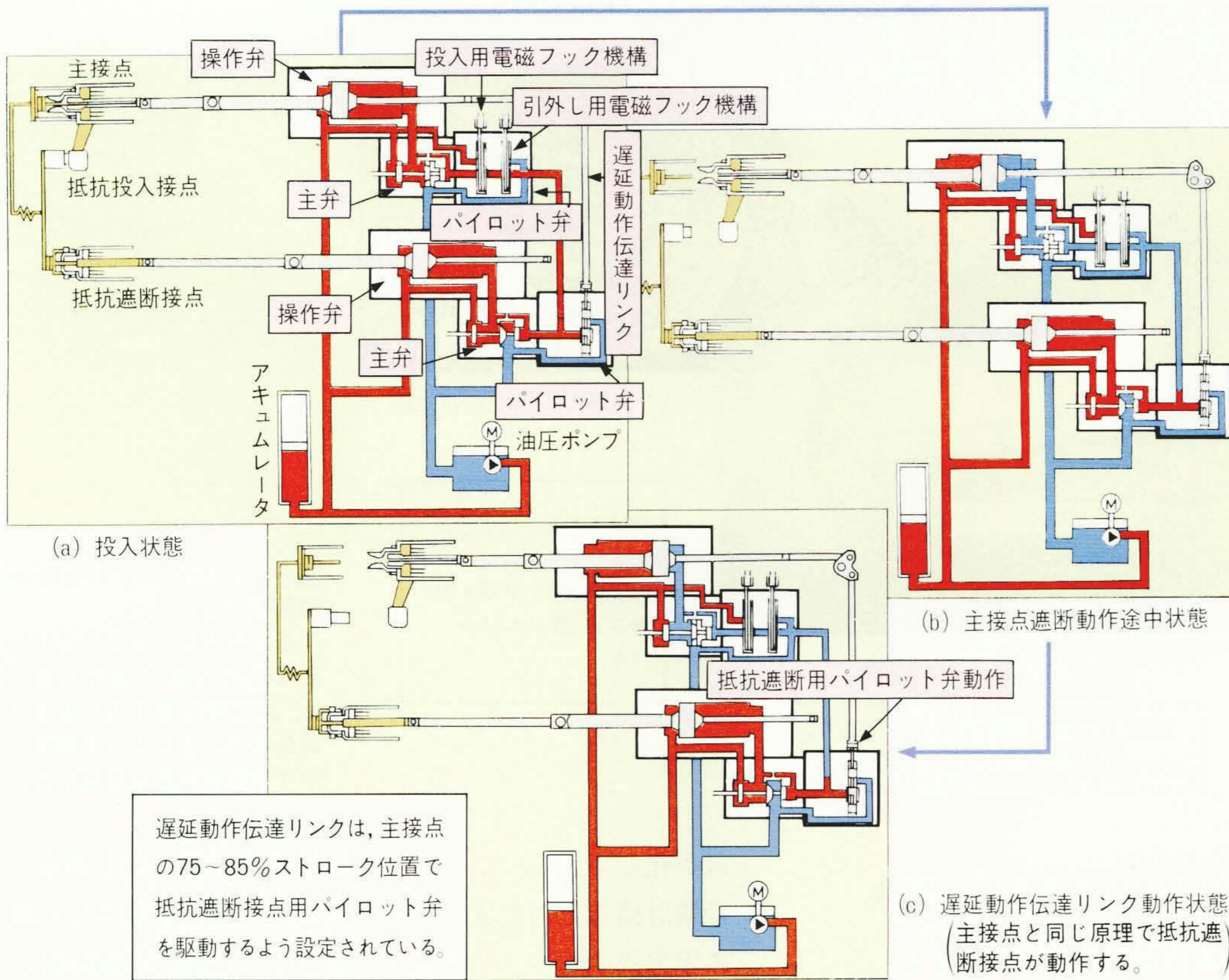


図5 遅延動作メカニズム
主接点の設定ストローク位置で機械的に抵抗遮断用パイロット弁を駆動させるので、温度の変化などによる動作時間のばらつきが少ない。

遮断-脱調投入-脱調遮断を考慮して決定されている。これらの動作による抵抗体への総注入エネルギーは約150 MJとなり、抵抗投入だけの500 kVガス遮断器と比較して約15倍の処理熱容量となる。

今回開発した抵抗体ユニットは、遮断部操作時の振動あるいは大電流遮断時の熱ガス流などの影響を極力受けない構造とすることを基本コンセプトとしている。遮断部ユニットとは、主接点および抵抗接点側ともおのこの

チューリップコンタクトによるプラグイン方式で接続される。

抵抗体ユニットの固有振動数および絶縁支持筒の強度を確認するため、遮断器全体の振動試験とは別にユニットでの振動試験も実施した。その試験状況を図6に示す。抵抗体ユニットの固有振動数で0.3 G正弦共振3波を試験ベースに印加し、絶縁支持筒の応力が設計許容値内であることを確認した⁵⁾。

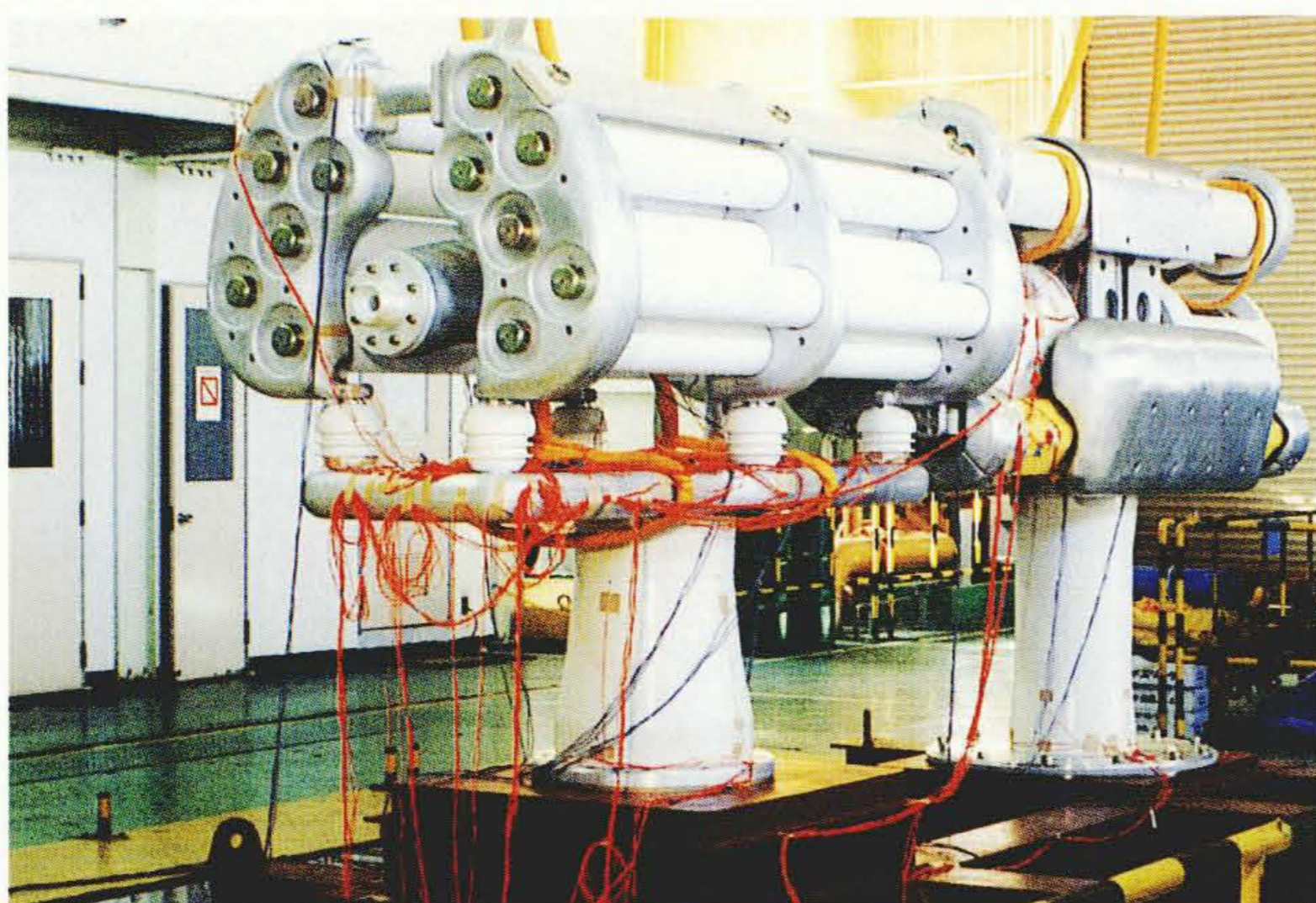


図6 抵抗体および遮断部ユニットの振動試験状況
0.3 G正弦共振3波を印加し、支持絶縁物などの応力および振動加速度が設計許容値内であることを確認した。

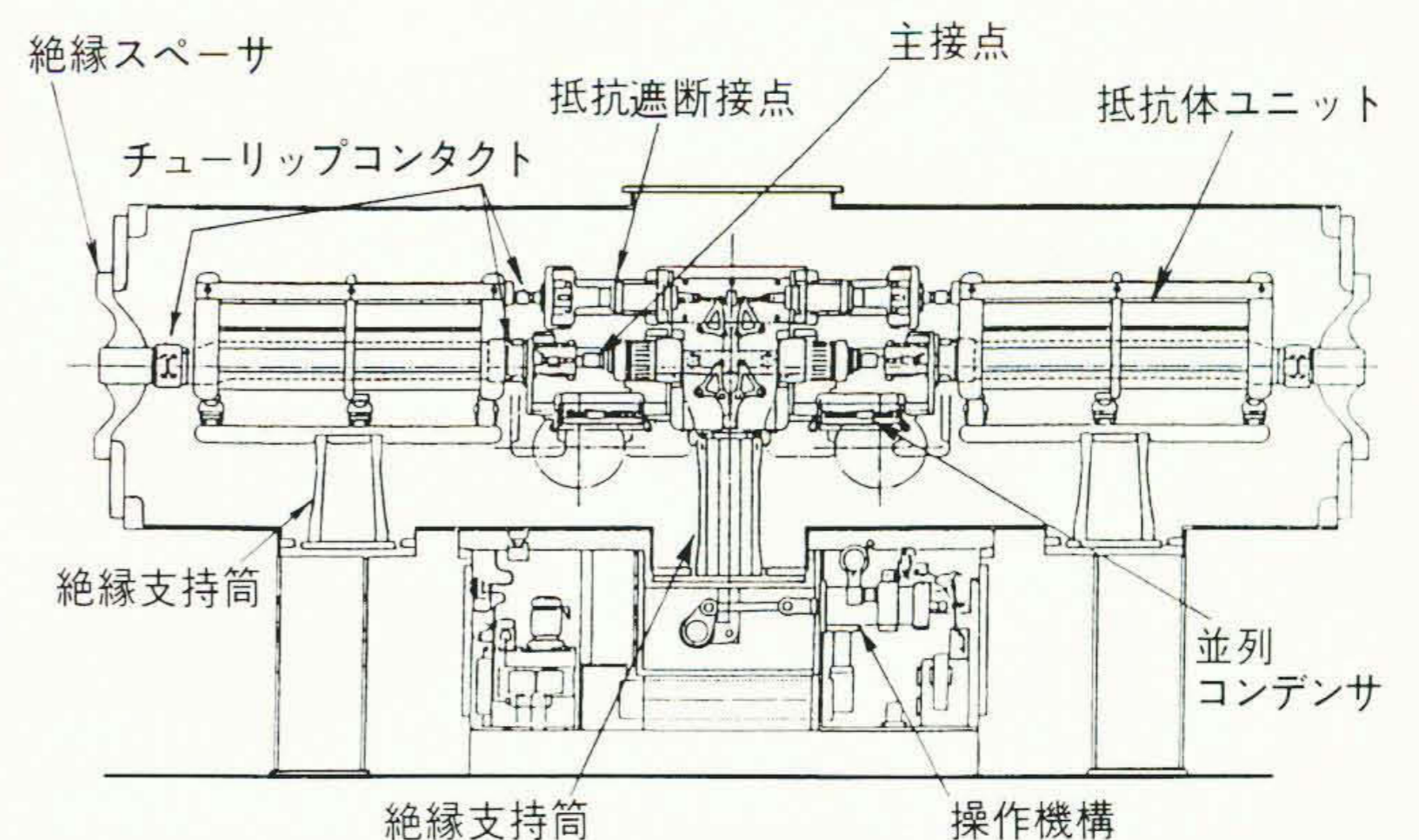


図7 1,000 kVガス遮断器の内部構造
遮断部ユニットと二つの抵抗体ユニットはチューリップコンタクトで接続されており、タンク内での調整・組立作業レス化を図っている。

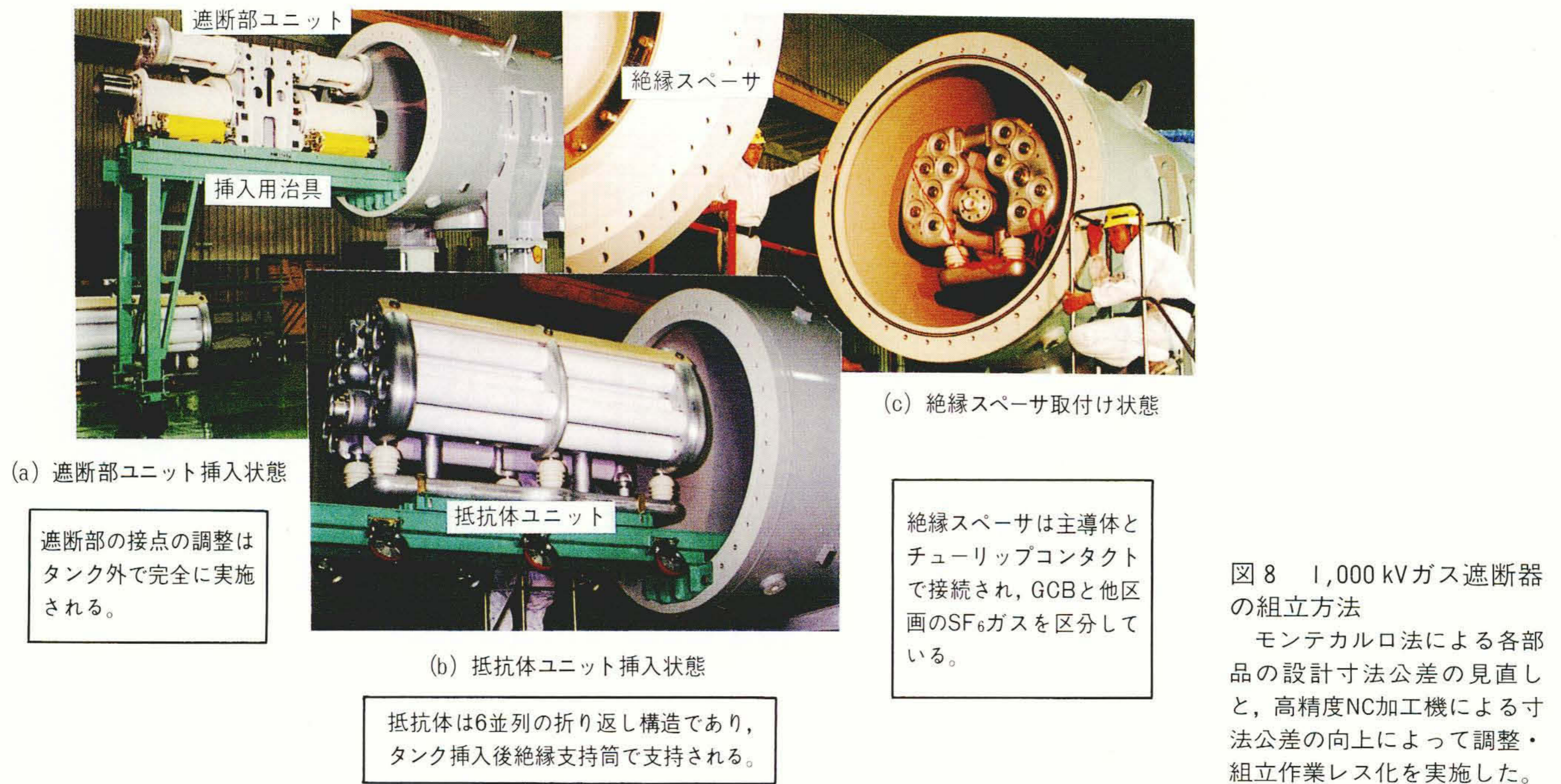


図8 1,000 kVガス遮断器の組立方法
モンテカルロ法による各部品
の設計寸法公差の見直し
と、高精度NC加工機による寸
法公差の向上によって調整・
組立作業レス化を実施した。

4 タンク内組立調整レス化による信頼性向上

金属パーティクルをタンク内で発生させないこと、あるいはタンク内に残さないことは、優れた絶縁特性を示すSF₆ガス絶縁機器にとって信頼性向上策の最重要課題である。タンク内での組立調整作業を極力低減する構造と作業方法を採用した。遮断器は一つの遮断部ユニットおよび二つの抵抗体ユニットで構成する。おのこのユニットはタンク外部で組立調整を行い、タンク内作業および内部調整の廃止をねらった構成としている。内部構造を図7に、組立方法を図8に示す。

専用のタンク挿入治具を用いて遮断部ユニット、抵抗体ユニットが挿入される。タンクを含めた各部品は、モンテカルロ法を用いて製作上の寸法ばらつき精度の確率偏差などを検討して設計公差が指定される。そして、最新の高精度NC(数値制御)加工機を使用して加工され寸法が管理・記録される。また組み合わせ部はインロー構造を採用し、回転方向の公差はリーマボルトを併用して

最小化している。このような部品公差精度の向上あるいは設計構造上の配慮により、組立員の技量に頼らない積み木方式のユニット構成が可能となった。日立製作所は、このように1,000 kVガス遮断器の組立時のタンク内作業・調整レスおよびクレーン作業レス化などを図り、国内最大の1,000 kV送電系統に使用される最重要機器としての信頼性向上策を実施している。

5 おわりに

以上、抵抗投入・遮断方式を採用した1,000 kVガス遮断器の開発について述べた。特に、抵抗遮断方式については、遅延動作機構の開発、高熱耐量抵抗ユニットの開発など、従来の機種にない技術的進歩を引き出している。これらの新規開発事項やタンク内組立レス・調整レス化などの高信頼性技術を500 kV以下の機種にも順次適用拡大して、さらに信頼性の高い経済的で使いやすいガス遮断器を開発していく考えである。

参考文献

- 1) 渡辺, 外: 1,000 kV遮断器の所要責務(その1)(UHV-I), 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(1983)
- 2) 山根, 外: 550 kV 63 kA一点切りガス遮断器の開発, 電気学会全国大会論文集(1984)
- 3) 山形, 外: 1,000 kV遮断器の所要責務(その2)(UHV-II), 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(1983)
- 4) 柳沼, 外: ガス遮断器の電流遮断時熱ガス流解析, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(1984)
- 5) 田中, 外: 1,000 kV 50kA 2点切ガス遮断器の性能検証, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(1984)